

梯度孔隙泡沫铜对石蜡蓄热性能影响研究

王磊, 陈华, 赵睿

天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月28日; 发布日期: 2023年4月7日

摘要

提高石蜡蓄热能力是发展相变蓄热技术的重要方法。为解决石蜡导热系数低的问题, 本文设计了六种不同的梯度孔隙泡沫铜布置方案, 探究了在泡沫铜平行和回型布置方式下, 梯度孔隙率变化对石蜡蓄热性能的影响规律。实验结果表明, 添加梯度孔隙泡沫铜可提高石蜡的温升速率和温度均匀性, 平行布置泡沫铜时, 94-96-98梯度孔隙率布置形式能够将温升速率提升30%~200%; 回型布置泡沫铜时, 98-96-94梯度孔隙率布置形式能将融化时间缩短15~30 min; 综合对比各方案, 泡沫铜平行布置优于回型布置, 泡沫铜平行布置且孔隙率分布为94-96-98时, 温度分布最均匀, 温升速率最快, 为最佳泡沫铜摆放方式。

关键词

相变蓄热, 金属泡沫铜, 石蜡, 实验研究

Study on Effect of Gradient Pore Copper Foam on Thermal Storage Performance of Paraffin Wax

Lei Wang, Hua Chen, Rui Zhao

Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 28th, 2023; published: Apr. 7th, 2023

Abstract

Improving the thermal storage capacity of paraffin wax is an important method to develop phase change thermal storage technology. In order to solve the problem of low thermal conductivity of paraffin wax, six different gradient porosity copper foam arrangement schemes were designed to investigate the influence law of gradient porosity change on the thermal storage performance of paraffin wax under the parallel and return type arrangement of copper foam in this paper. The experimental results showed that the addition of gradient porosity copper foam could improve the temperature rise rate and temperature uniformity of paraffin wax, and the 94-96-98 gradient porosity

arrangement could increase the temperature rise rate by 30%~200% when the copper foam was arranged in parallel; the 98-96-94 gradient porosity arrangement could shorten the melting time by 15~30 min when the copper foam was arranged in return pattern. After a comprehensive comparison of the schemes, the copper foam parallel arrangement is better than the turn-shape arrangement. When the copper foam is arranged in parallel and the porosity distribution is 94-96-98, the temperature distribution is the most uniform and the temperature rise rate is the fastest, which is the best way to place the copper foam.

Keywords

Phase Change Thermal Storage, Metallic Copper Foam, Paraffin Wax, Experimental Research

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“双碳”目标提出以来[1], 储能技术发展备受关注, 其中相变蓄热技术不仅应用领域广[2] [3], 还有助于保护环境、降低碳排放、提高能源利用率, 符合当前我国的能源发展需求。石蜡凭借其易于获得、成本低、无毒害等优势, 常作为相变材料进行相变蓄热[4], 但其导热性差、蓄热能力有限等缺点[5]严重制约了石蜡在蓄热领域的发展。国内外研究者为解决这一难题, 往往通过添加高导热泡沫金属来改善石蜡的蓄热能力。

在添加均质孔隙泡沫金属方面, Zhao 等人[6]对泡沫金属 - 石蜡复合相变材料的固液相变(融化和凝固)过程进行了实验研究。研究表明, 泡沫金属的加入可以使整体传热速度提高 3~10 倍。Cui 等人[7]对是否填充泡沫铜的石蜡进行实验研究, 结果表明, 泡沫铜提高了蓄热单元内的温度分布均匀性, 使蓄热时间显著降低。Yang 等人[8]将石蜡和孔隙率为 92%的泡沫铜结合构成相变材料, 研究管壳式潜热蓄热单元充热时的动态热性能, 实验结果表明, 在相同的操作条件下, 复合相变材料的完全融化时间比纯石蜡短 1/3 以上。以上实验研究证明, 在石蜡内部添加均质泡沫金属能够显著提升蓄热性能, 其中金属泡沫铜的导热及稳定性能最好。为了使泡沫金属/石蜡的复合相变材料的蓄放热性能进一步提升, 国内外研究者提出采取梯度孔隙泡沫金属。在添加梯度泡沫金属方面, Zhang [9]测试了不同梯度孔隙率泡沫金属的相变材料的融化情形, 研究显示, 增大泡沫金属的孔隙率均能提高其蓄热密度。吴佳妮[10]实验研究了梯度泡沫金属构成的复合相变材料的导热性能。结果发现, 将热源处布置孔隙率较低的梯度泡沫金属构成的复合相变材料, 可以使得相变材料整体的融化时间可缩短了 37.6%。Mahdil [11]利用数值模拟的方法, 针对梯度孔隙率布置对添加金属泡沫的复合相变材料的影响进行了仿真计算。结果表明, 合理地设置梯度孔隙率可以显著提高蓄/放热效率。Tao 等人[12]模拟研究了泡沫金属的孔隙率对复合相变材料的性能影响规律, 发现将孔隙率较大的泡沫铜布置于热源侧时, 传热效果更好, 温度均匀性更好。

上述研究表明, 梯度孔隙泡沫金属能够有效提高相变材料的蓄热性能, 梯度泡沫金属的应用对于泡沫金属在相变领域的发展有着理论指导作用, 然而, 最佳梯度孔隙率的布置形式研究还不够完善。本文搭建相变蓄热性能实验台, 以泡沫铜复合石蜡为相变蓄热材料, 对比分析梯度孔隙率及泡沫铜的布置方式对相变材料融化过程中的温度分布的影响, 实验结果可为改善复合相变材料的蓄热性能提供理论依据。

2. 实验方案及测点布置

本实验测试中将测试箱放入恒温水浴, 保持加持温度恒定, 直至石蜡在箱体内完全融化, 蓄热过程

结束,测试箱中布置的热电偶连接 MX100 数据采集仪,将采集到的温度数据传输至计算机中。相变材料测试箱、恒温水浴箱、数据采集器等测试系统图见图 1,实验所用主要仪器及其精度见表 1。石蜡相变蓄热箱尺寸为 180 mm × 120 mm × 200 mm。恒温水浴中水面位置应高于箱内相变材料,将相变材料高度设定为 80 mm。根据热流型差示扫描量热仪测量得到所选取的石蜡凝固点为 47.29℃,融化点为 57.07℃,导热系数为 0.21 W/(m·K),密度为 900 kg/m³,相变潜热值为 137.4 J/g。本文所采用的泡沫铜孔隙率为 94%、96%、98% 三种,孔密度为 20 PPI,密度为 8930 kg/m³,尺寸为 100 mm × 100 mm × 10 mm。

本实验设计平行和回型两种泡沫铜布置方案,在此基础上分别设定 96-96-96、98-96-94 和 94-96-98 三种孔隙率的分布方式,共六种泡沫铜/石蜡布置方案,如表 2 所示,图中黄色、蓝色和绿色长条分别表示孔隙率为 96%、98%、94% 的泡沫铜,例如 Case 5 代表泡沫铜回型布置且孔隙率从外到内分布为 98-96-94。为确保实验精准度,每种方案热电偶的排布位置相同。图 2 为测点布置图,其中红点代表测点位置,长度方向上每两片相邻的泡沫铜之间均布置一个测点,高度方向上将相变材料三等分,并分成 F、G 两层测点,两层测点一一对应。

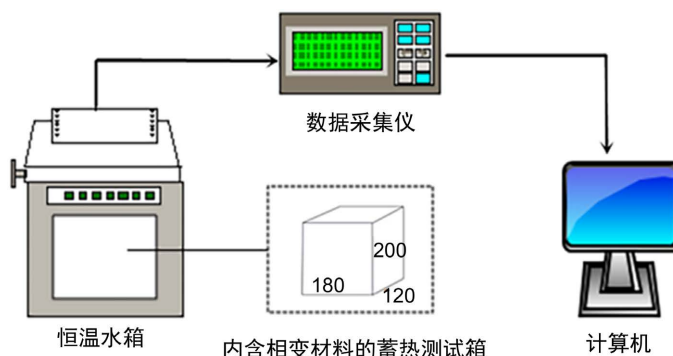


Figure 1. Flow chart of phase change thermal storage experiment
图 1. 相变蓄热实验流程图

Table 1. Measuring instruments and their parameters

表 1. 测量仪器及其参数

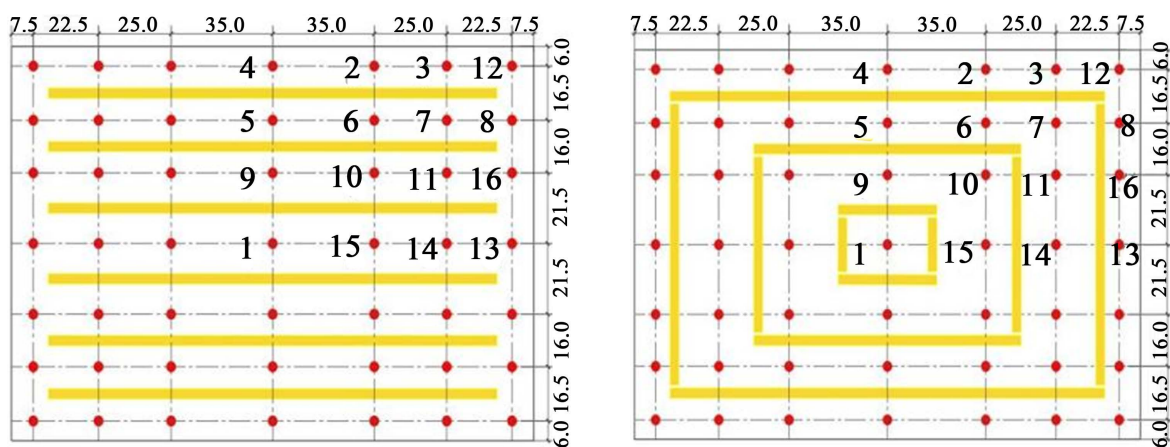
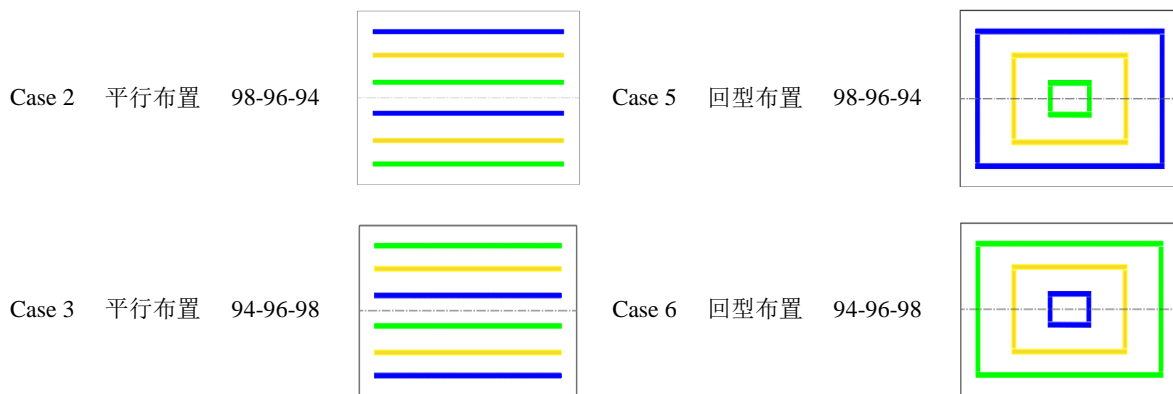
实验仪器	仪器型号	测量范围	精度
恒温水浴箱	BT-V30A	+5℃~100℃	±0.1℃
数据采集器	MX100-E-1H	-	±0.1℃
热电偶	铜-康铜热电偶	-40℃~125℃	±0.5℃
差示扫描量热仪	DSC-Q1000	-90℃~550℃	±0.5℃

Table 2. Arrangement solution of copper foam/paraffin wax

表 2. 泡沫铜/石蜡布置方案

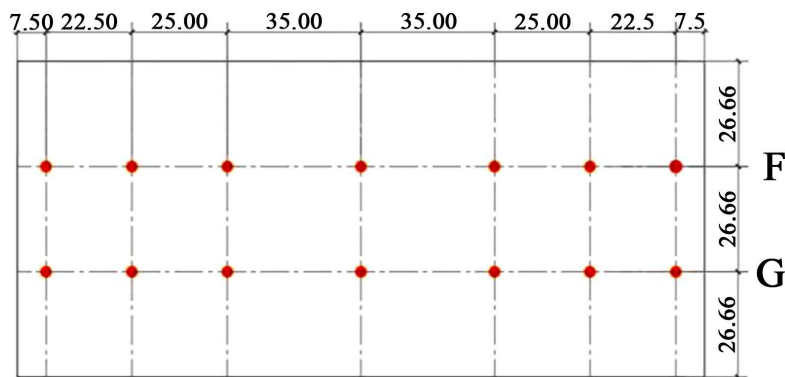
方案名称	布置形式	孔隙率组合	示意图	方案名称	布置形式	孔隙率组合	示意图
Case 1	平行布置	96-96-96		Case 4	回型布置	96-96-96	

Continued



(a) Cases 1~3 测点俯视图

(b) Cases 4~6 测点俯视图



(c) 测点主视图

Figure 2. Layout of measurement points

图 2. 测点布置图

3. 结果分析

3.1. 平行布置时不同孔隙率对比

每组测点中，测点 1 在蓄热箱的中心，温升缓慢，测点 12 靠近壁面，温升迅速，故选取这两点作为特征点，对泡沫铜平行摆放的 Cases 1~3 和纯石蜡方案进行比较分析。

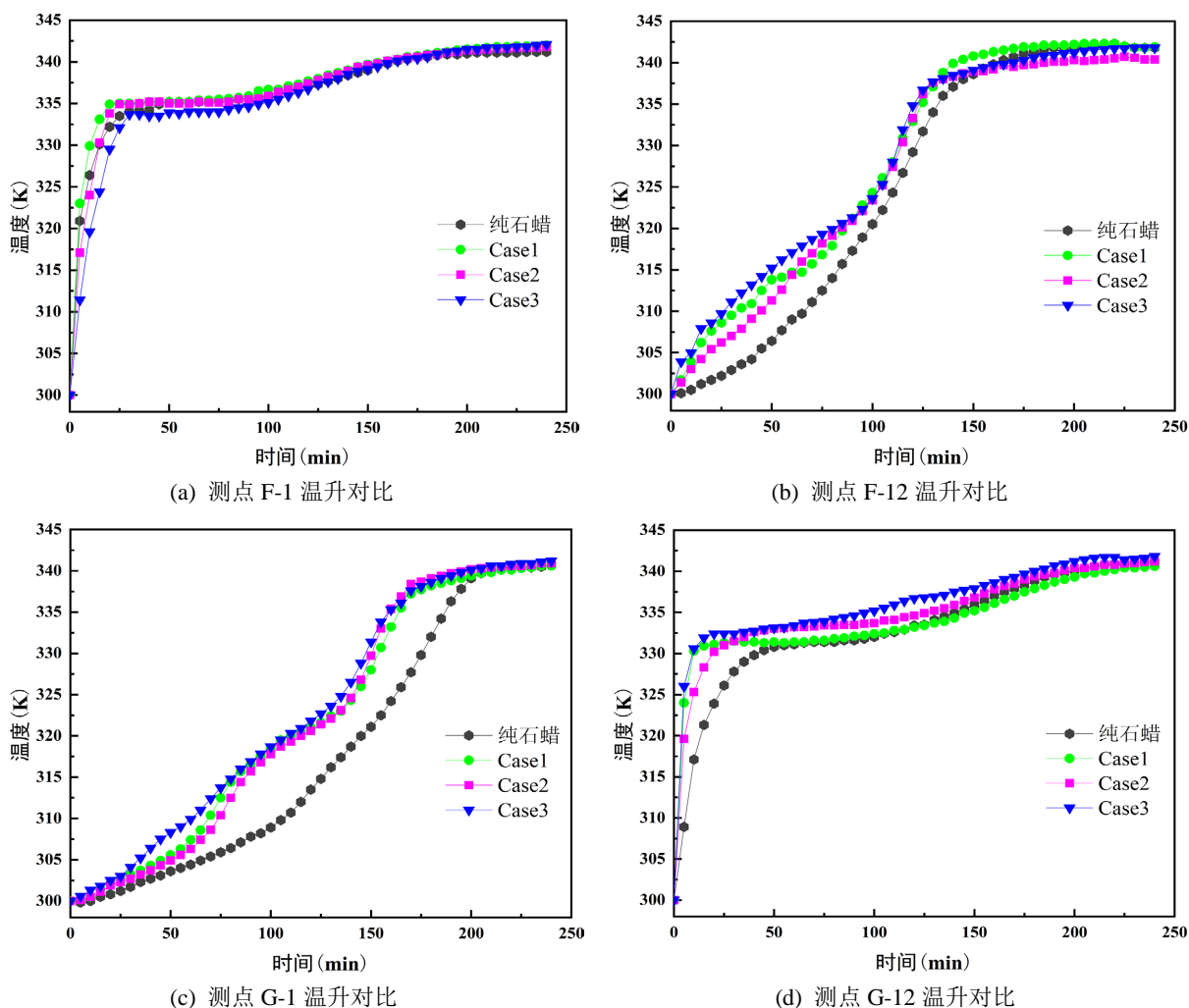


Figure 3. Comparison of temperature rise of measurement points in Cases 1~3
图 3. Cases 1~3 测点温升对比图

Table 3. Temperature rise rate and melting schedule in Cases 1~3
表 3. Cases 1~3 温升速率及融化时间表

温升速率 (k/min)及 融化时间 (min)	Case 1				Case 2				Case 3				纯石蜡			
	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12
前期温 升速率	0.28	0.13	0.23	0.10	0.30	0.17	0.13	0.06								
中期温 升速率		2.01	3.03	2.02	1.51	2.99	3.06	1.52	0.75							
融化时 间	115	15	160	10	115	15	155	20	115	10	150	10	130	20	175	45

从图 3 和表 3 来看，相变材料的蓄热过程可划分为前、中、后三个时期。蓄热开始的最初 50 min 为蓄热前期，石蜡处于固态，导热为热量传递方式；蓄热阶段的 50~200 min 为蓄热中期，热量不断向内传递，石蜡由外而内逐渐融化成液态，石蜡融化后密度降低，体积增大，且由于重力和浮力的作用，石蜡

内部开始出现自然对流现象, 热量以导热和自然对流的形式传递; 200 min 后为蓄热后期, 石蜡完全成为液态, 随后石蜡温度稳定, 蓄热结束。由于测点 F-12 和测点 G-12 靠近热源, 温升速率高, 仅需 50 min 完成融化并进入蓄热后期, 故其蓄热的前中期很难划分, 后文研究此点的温度变化时将其蓄热的前中期合并为一期进行探析。

对 F 层测点的分析表明, 测点 F-1 处, 蓄热前期, 添加泡沫铜的三种平行布置方式下, 测点温度和温升速率都比纯石蜡的高, 说明泡沫铜平行布置均能使石蜡导热性能得到有效改善, Case 3 的温升速率为 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 较 Case 1 和 Case 2 提升 7% 和 30%, 原因是 Case 3 外层泡沫铜孔隙率低, 导热性能好, 利于热量传递; 蓄热中期, 三种布置方式温升速率接近, Case 1、Case 3 的温升速率为 $0.26\sim 0.29^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 间。测点 F-12 处, 50 min 后, 各种布置方式间温度差异很小, 与纯石蜡温差仅为 1 K, Case 1、Case 2 的温升速率均比纯石蜡高 32%, 改善效果相似, 但 Case 3 改善效果显著提升, 温升速率较纯石蜡高 96.7%, 且 Case 3 进入蓄热后期的时间较 Case 1、Case 2 缩短 5 min。可见 F 层上, Case 3 在提高蓄热能力上表现最佳。G 层中, 测点 G-1 处, 蓄热前期, Case 1 到 Case 3 的温升速率分别较纯石蜡提升 116.7%、66.7% 和 183.3%; 蓄热中期, Case 2 温升速率为 $0.27^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 分别为 Case 1、Case 3 的 1.5 倍和 1.17 倍, 可以看出, 在蓄热前期和中期添加三种梯度孔隙泡沫铜的优化效果有差异, Case 3 中外层泡沫铜具有更好的导热性, 提高了蓄热初期的温升速率, 而 Case 2 中外层泡沫铜孔隙率高, 有利于蓄热中期自然对流, 蓄热中期温升速率较快。测点 G-12 距离热源最近, 该测点 Case 1、Case 3 的温升速率约为纯石蜡的 4 倍, 较纯石蜡提前 35 min 进入后期, Case 2 的温升速率是 Case 1、Case 3 的一半, 因为外层测点靠近热源较近, 蓄热在前 50 min 内完成, 这段时间蓄热箱内以导热为传热方式, Case 2 的梯度孔隙布置对导热性的提高有限, 因此与其他两种方式差异很大, 可以看出, 这种放置方式不利于蓄热箱外层测点温度的提高。综合 F、G 层可见, 复合相变材料相比于纯石蜡, 能缩短融化时间 10~25 min, 极大地改善了蓄热性能, 其中 Case 3 将低孔隙率泡沫铜布置于热源侧明显提高了导热性能, 各测点融化更快, 蓄热效果更好。

3.2. 回型布置时不同孔隙率对比

图 4 和表 4 将泡沫铜回型布置的 Cases 4~6 与纯石蜡方案进行对比。

对图中 F 层中心点 F-1 的分析表明, 蓄热前期, Case 4~6 相差不大, Case 4 和 Case 6 温升速率达 $0.21^{\circ}\text{C}/\text{min}$, Case 5 温升速率达 $0.19^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 但都比纯石蜡速率高, 分别为纯石蜡的 1.6、1.5 倍, 可见泡沫铜回型布置时也能极大改善纯石蜡的蓄热性能, 使蓄热前期温升速率明显提高; 蓄热中期, Cases 4~6 温升速率约为 $0.26^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 与纯石蜡在 130 min 时同步完成融化, 可见三种方案对中间测点的提升效果不显著, 主要是回形泡沫铜与周围热源位置保持平行, 阻碍了自然对流, 不利于热量的传递。测点 F-12 处, Cases 4~6 温升速率比纯石蜡快 31.6%、35.5% 和 44.7%, 融化时间均缩短 5 min。三种方案蓄热效果均优于纯石蜡, 其中方案 6 提升蓄热效果更好, 方案 5 次之, 但 Case 6 对内层石蜡的优化能力受限, 不利于内层测点温升, 造成整体温度均匀性降低。故对外层测点来讲, Case 5 蓄热效果最好。测点 G-1 处, 蓄热前期, Cases 4~6 温升速率差别明显, 分别为纯石蜡的 1.3 倍、2.0 倍、1.8 倍, Case 5 的蓄热效果优于 Case 4、Case 6, Case 5 的孔隙布置方式加速了外部高温液体向内部对流, 热量传递加快; 蓄热中期, Case 5 温升速率为 $0.27^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 比 Case 4、Case 6 提高 17.3%, 并提前 15 min 进入蓄热后期, 换热效果得到极大提高, 因为回型布置泡沫铜影响液体石蜡流动及自然对流换热, 影响蓄热中期温升速率。测点 G-12 处, Cases 4~6 温升速率相差极小, 且均为纯石蜡的 2 倍, 强化蓄热效果显著, 且分别比纯石蜡早 20 min、20 min、15 min 进入蓄热后期。对比 Cases 4~6 三种方案, 从 F 和 G 层整体上看都是 Case 5 最好, Case 5 将高孔隙率泡沫铜布置于热源侧, 可有效缩短石蜡融化时间, 且对石蜡对流换热影响较小。

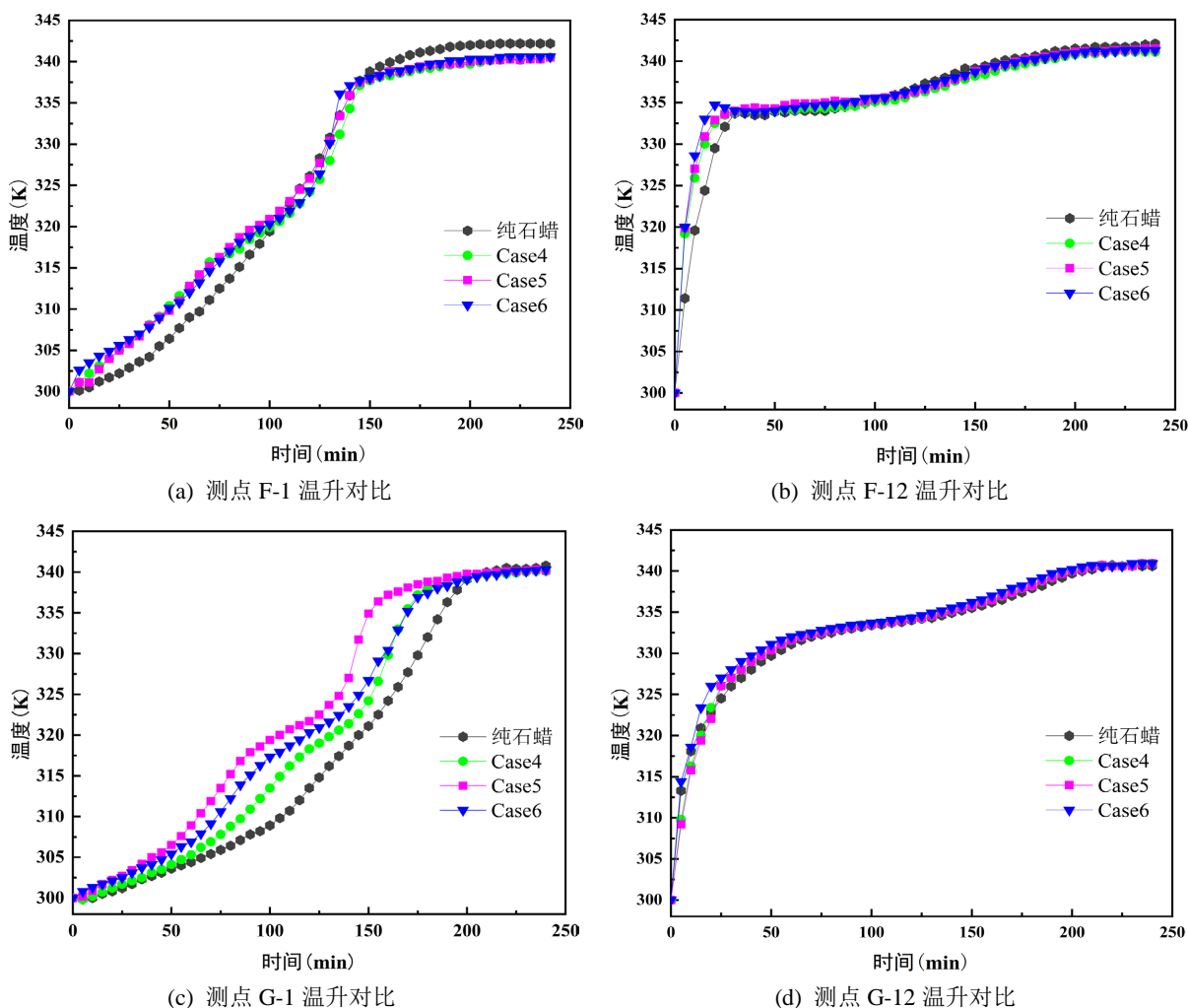


Figure 4. Comparison of temperature rise of measurement points in Cases 4~6
图 4. Cases 4~6 测点温升对比图

Table 4. Temperature rise rate and melting schedule in Cases 4~6
表 4. Cases 4~6 温升速率及融化时间表

温升速率 (k/min)及 融化时间 (min)	Case 4				Case 5				Case 6				纯石蜡			
	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12	F-1	F-12	G-1	G-12
前期温 升速率	0.21	0.08			0.19	0.12			0.21	0.11			0.13	0.06		
中期温 升速率	0.26	2.00	0.23	1.51	0.26	2.06	0.27	1.50	0.25	2.20	0.23	1.50	0.30	1.52	0.21	0.75
融化时 间	130	15	160	20	130	15	145	20	130	15	160	25	130	20	175	40

3.3. 蓄热最佳布置方式

3.3.1. 温度均匀性对比

复合相变材料表面温度分布不均匀度用参数 σ [13] 表征, 温度不均匀度越小, 温度均匀性越好, 反之,

均匀性越差。计算公式(1)如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(T_F - T_g)^2 + (T_G - T_g)^2]} \quad (1)$$

式中: σ : 温度不均匀度, 无量纲;

T_F : F 层测点温度平均值, K;

T_G : G 层测点温度平均值, K;

T_g : 所有测点温度平均值, K。

图 5 为各方案温度不均匀度随时间的变化规律。蓄热前期, 温度均匀性最优的是 Case 3, 其次为 Case 6, 其原因是孔隙率从外到内为 94-96-98 的布置方式利于热传导且能降低石蜡内部温差, 故在蓄热前期温度均匀性显著提高; 蓄热中期, 平行布置中 Case 3 温度均匀性最佳, 回型布置时 Case 5 温度分布更均匀, 因为回型布置对石蜡的自然对流有一定的影响, 从而制约了外层液相石蜡与内部的对流换热, 同时 Case 5 外层孔隙率较大, 石蜡的自然对流受影响程度更小, 所以温度更均匀。综合考虑, Case 3 应作为各种布置下温度均匀性的最优方法。

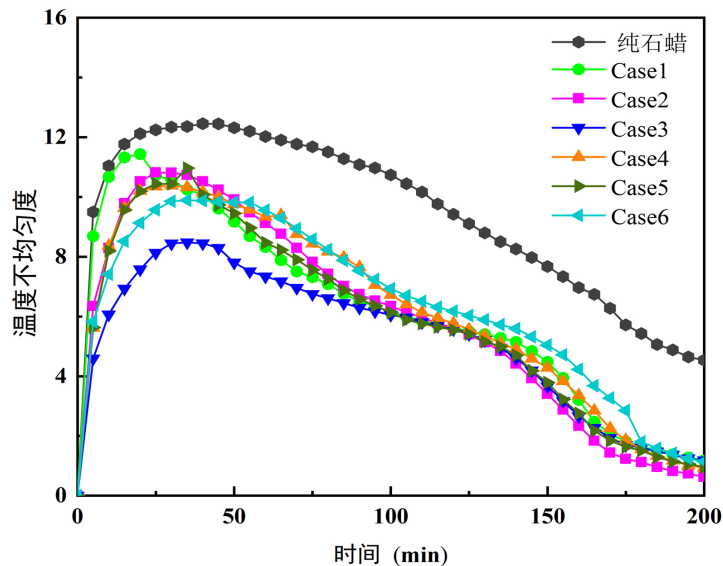


Figure 5. Variation of temperature inhomogeneity with time in different schemes

图 5. 不同方案温度不均匀度随时间变化图

3.3.2. 温升速率对比

综合以上分析, 平行及回型排列的最优布置方式分别是 Case 3 和 Case 5。故分别对这 2 组方案的温升速率进行了比较, 以确定最优的布置方式。

如图 6 所示, $F-1$ 处 Case 3 测点温度始终比 Case 5 高, 温差稳定在 5 K 左右。蓄热前期, Case 3 温升速率较 Case 5 提高 57.9%; 蓄热中期, Case 3 与 Case 5 温升速率相近, 但 Case 3 比 Case 5 提前融化。测点 $G-1$ 处, 蓄热前期, Case 3 温升速率比 Case 5 提升 41.7%; 蓄热中期, 两者相差不大, 同时进入蓄热后期。这是由于 Case 3 为平行摆放泡沫铜, 较回型摆放对石蜡内部对流换热的阻碍作用更小, 从而有利于中心位置的换热。测点 $F-12$ 处, Case 3 温升速率是 Case 5 的 1.45 倍, 并更早完成融化, 这是因为当外层低孔隙率的泡沫铜存在时, 外部石蜡会迅速升温融化并与内层石蜡产生温度差, 内层高孔隙率的泡沫铜对内部石蜡的自然对流作用影响较小, 使外部热量更好地扩散到内层, 有效地提升了内部温度,

从而早于 Case 5 融化。测点 G-12 处, Case 3 的温升速率是 Case 5 的 2.04 倍, 也提前完成蓄热。对比显示, Case 3 蓄热速率更高, 融化更快。综上, Case 3 应为所有布置中蓄热效果最佳方式。

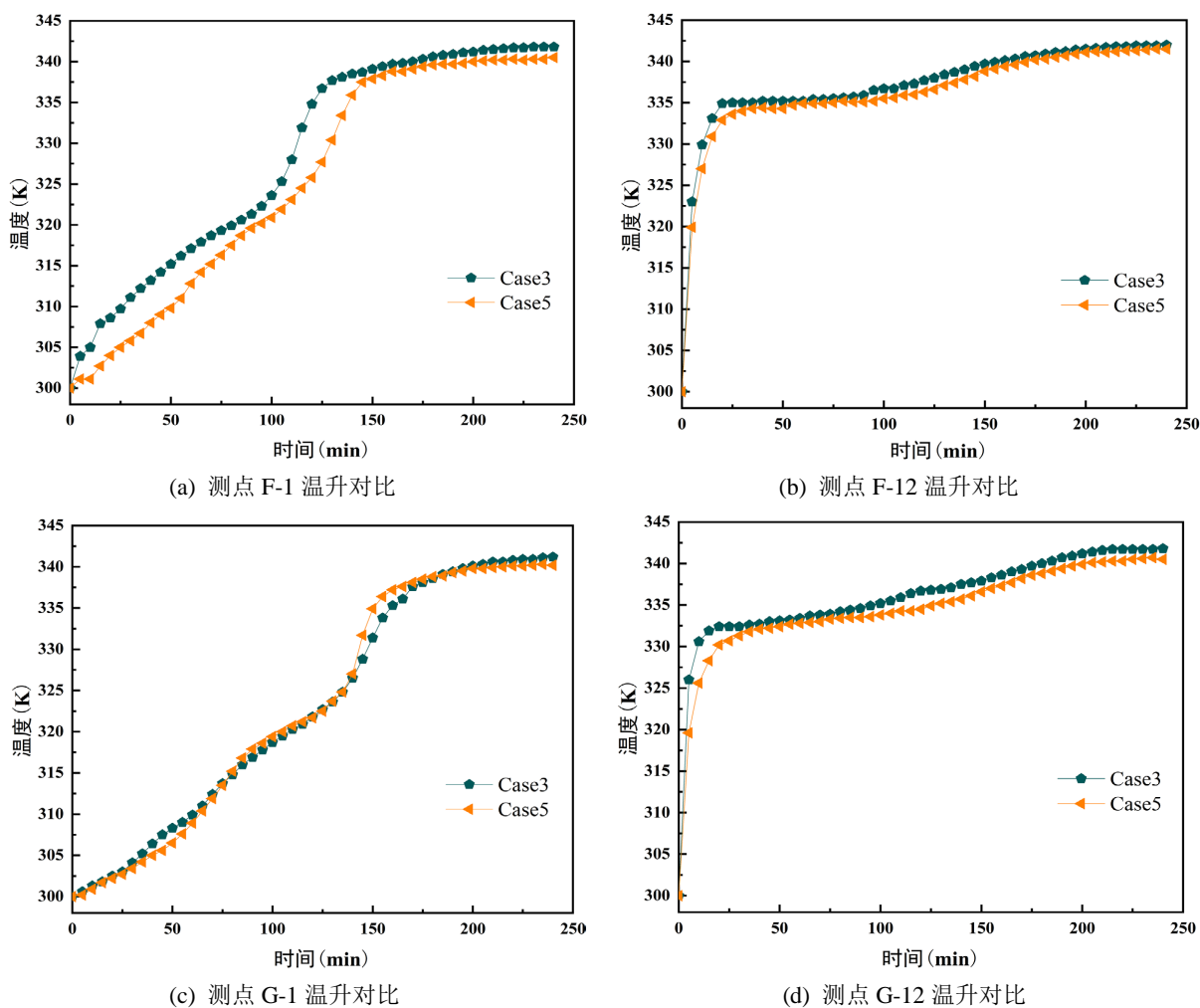


Figure 6. Comparison of temperature rise in Case 3 and Case 5

图 6. Case 3、Case 5 温升对比图

4. 结论

本文将不同梯度孔隙率泡沫铜在石蜡中采用平行和回型两种方式布置, 对梯度孔隙率布置形式对蓄热效果的影响进行实验研究, 通过对比分析不同方案下复合梯度泡沫铜石蜡相变材料与石蜡的温升速率、融化时间和温度不均匀度等指标, 确定最适宜的泡沫铜布置方案。结论如下:

- 1) 泡沫铜的加入可明显提高石蜡的蓄热效率及温度均匀性, 平行布置泡沫铜可使石蜡融化时间缩短 5~35 min, 回型布置泡沫铜可减少 5~30 min, 蓄热效果改善显著。
- 2) 泡沫铜平行布置时, 94-96-98 孔隙率布置能够将温升速率提升 30%~200%, 较其他方案融化快, 温度均匀性更佳。
- 3) 泡沫铜回型布置时, 98-96-94 孔隙率布置将融化时间缩短 15~30 min, 温度分布更均匀。
- 4) 综合对比各梯度泡沫铜/石蜡复合材料蓄热性能, 泡沫铜平行布置且孔隙率从外到内分布为 94-96-98 时, 蓄热速率最快, 温度分布最均匀, 为蓄热效果最佳布置方式。

参考文献

- [1] 周宏春, 管永林. 对碳中和导向下我国能源发展的若干战略思考[J]. 中国经济报告, 2021(6): 108-120.
- [2] 方桂花, 刘殿贺, 张伟, 等. 复合类相变蓄热材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(6): 6-10.
- [3] 张瑞, 焦密. 高导热能力的蓄热装置传热性能研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(5): 37-41.
- [4] 张贺磊, 方贤德, 赵颖杰. 相变储热材料及技术的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(13): 26-32.
- [5] 王子晨. 泡沫铝/石蜡复合相变材料蓄热实验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [6] Zhao, C.Y., Lu, W. and Tian, Y. (2010) Heat Transfer Enhancement for Thermal Energy Storage Using Metal Foams Embedded within Phase Change Materials (PCMs). *Solar Energy*, **84**, 1402-1412. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.022>
- [7] Cui, H.T. (2012) Experimental Investigation on the Heat Charging Process by Paraffin Filled with High Porosity Copper Foam. *Applied Thermal Engineering*, **39**, 26-28. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.037>
- [8] Yang, J., Yang, L., Xu, C. and Du, X. (2016) Experimental Study on Enhancement of Thermal Energy Storage with Phase-Change Material. *Applied Energy*, **169**, 164-176. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.028>
- [9] Zhang, Z. and He, X. (2017) Three-Dimensional Numerical Study on Solid-Liquid Phase Change within Open-Celled Aluminum Foam with Porosity Gradient. *Applied Thermal Engineering*, **113**, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.173>
- [10] 吴佳妮. 梯度泡沫金属强化中温相变储热单元热性能实验研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [11] Mahdi, J.M. and Nsofor, E.C. (2018) Multiple-Segment Metal Foam Application in the Shell-and-Tube PCM Thermal Energy Storage System. *Journal of Energy Storage*, **20**, 529-541. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.021>
- [12] Tao, Y.B., You, Y. and He, Y.L. (2016) Lattice Boltzmann Simulation on Phase Change Heat Transfer in Metal Foams/Paraffin Composite Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, **93**, 476-485. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.016>
- [13] 康智强, 徐博文, 夏晓东, 孙健, 常志宇. 地面毛细管辐射板的温度不均匀性和供热能力数值分析[J]. 节能, 2020, 39(10): 15-17.